

变形监测技术在桥梁监测中的应用

尉青青¹ 张 鑫¹ 王海荣²

1. 陕西高速公路工程试验检测有限公司 陕西 西安 710086

2. 陕西高速星展科技有限公司 陕西 西安 710086

摘 要：本文围绕变形监测技术在桥梁监测中的应用展开。阐述了桥梁变形监测涵盖垂直位移、水平位移、倾斜度、裂缝扩展等内容与目标。介绍了常用几何、物理、图像监测技术的原理与特点。详细说明了监测方案设计、数据采集、处理与分析的应用流程。分析了监测精度受自然与技术条件制约、多源数据融合困难等挑战，并展望了智能化与协同监测的发展方向，为桥梁安全监测提供技术参考。

关键词：桥梁变形监测；监测技术；数据融合；智能化监测

引言：桥梁作为交通枢纽，其安全稳定运行至关重要。在长期运营过程中，车辆荷载、环境因素等影响下，桥梁易发生变形，引发安全隐患。变形监测技术作为保障桥梁安全的重要手段，能够实时掌握桥梁结构状态变化。目前桥梁变形监测面临诸多问题，如监测精度受多种因素影响、多源数据融合存在困境等。深入研究变形监测技术在桥梁监测中的应用，探索其发展方向，对于提升桥梁监测水平、保障交通运输安全具有重大意义。

1 桥梁变形监测的内容与目标

1.1 桥梁变形监测的主要内容

垂直位移监测聚焦桥梁在竖向空间的位置变化。车辆反复碾压、基础土层特性变化以及季节性温差，都会使桥梁产生垂直方向的位移。对桥墩基础、梁体跨中等关键部位进行垂直位移监测，可清晰掌握桥梁沉降或抬升情况，判断基础是否稳定，上部结构是否因荷载失衡出现异常下沉。水平位移监测关注桥梁在水平方向的移动轨迹。强风侵袭、水流冲刷、地震波动等外力作用下，桥梁墩台、梁体会发生横向或纵向位移。通过对这些部位水平位移的持续观测，能够评估桥梁抵御水平荷载的能力，判断是否存在因外力冲击导致的结构偏移风险。倾斜度监测用于检测桥梁整体或局部的倾斜状态^[1]。基础不均匀沉降、偏心荷载长期作用，会打破桥梁原有的平衡状态，造成结构倾斜。倾斜度的变化不仅影响桥梁外观，更会改变内部受力分布，降低承载能力。监测桥梁各关键部位的倾斜度，能及时发现潜在的倾覆隐患。裂缝扩展监测针对桥梁结构表面及内部裂缝的发展态势。混凝土收缩、温度应力积累、疲劳荷载作用，容易使桥梁出现裂缝。一旦裂缝形成，若未及时监测控制，会随着时间推移不断延伸、变宽，严重时导致结构失效。对裂缝

的长度、宽度、深度及走向进行监测，可掌握其发展规律，评估对桥梁安全的威胁程度。

1.2 桥梁变形监测的目标

桥梁变形监测围绕垂直位移、水平位移、倾斜度、裂缝扩展等维度开展持续观测与分析，核心目标在于快速察觉结构异常变化。桥梁日常运营中，车辆荷载、环境因素不断作用，微小的位移突变或裂缝扩展，都可能预示潜在安全隐患。及时捕捉这些异常，能为后续处理预留宝贵时间，避免隐患扩大引发严重事故。全面的监测信息为桥梁养护维修筑牢根基。依据垂直位移判断基础沉降与上部结构稳定状况，借水平位移评估桥梁抵御外力冲击能力，通过倾斜度与裂缝扩展分析结构内部受力变化。基于这些信息，养护人员得以制定精准养护方案，锁定维修关键区域，科学规划维修流程，保障桥梁长期稳定运行，维系交通运输安全高效，充分发挥其交通枢纽价值。

2 常用变形监测技术原理与特点

2.1 几何测量技术

水准测量技术基于液体静力水准原理，通过建立水平视线，比较不同监测点的高程差异。在桥梁垂直位移监测中，利用水准仪与水准尺配合，沿桥梁特定线路布设监测点，将基准点与监测点的高程进行精确比对，从而确定各点垂直位移情况。该技术具有较高精度，能满足毫米级位移监测需求，适合小范围、高精度的变形监测。全站仪测量技术利用光电测距原理，结合测角系统，可同时测定监测点的水平角、垂直角和斜距，进而解算出三维坐标。在桥梁监测时，全站仪架设在稳定测站点，对桥梁各监测目标进行观测，通过坐标变化反映结构位移。其优势在于可实现远距离、非接触测量，适用于地形复杂、难以接近的桥梁结构部位监测，且能快

速获取多个点位数据。全球导航卫星系统 (GNSS) 测量依靠接收卫星信号, 通过信号传播时间计算监测点与卫星间距离, 利用多颗卫星的距离交会确定点位坐标。在桥梁监测中, GNSS接收机安装于桥梁监测点, 实时接收卫星信号, 动态解算坐标。该技术不受通视条件限制, 能实现全天候、连续定位, 适合大范围、长距离的桥梁变形监测, 尤其适用于监测桥梁整体位移趋势。

2.2 物理测量技术

光纤传感技术基于光在光纤中传输时, 外界物理量变化会引起光的强度、波长等特性改变的原理。在桥梁监测中, 将光纤铺设于桥梁结构关键部位, 当桥梁发生变形, 光纤随之产生应变, 通过解调光信号变化, 实现对桥梁变形的分布式监测。其优势在于可长距离、连续监测, 且抗电磁干扰能力强, 能及时捕捉微小变形^[2]。激光扫描技术通过发射激光束, 测量激光从发射到反射回仪器的时间, 结合激光发射角度, 获取监测目标表面的三维坐标信息。在桥梁监测时, 激光扫描仪围绕桥梁扫描, 快速获取桥梁表面海量点云数据, 构建高精度三维模型。利用该模型可直观分析桥梁结构形状变化, 尤其在检测桥梁复杂结构变形、表面病害方面表现出色。应变片监测技术基于金属电阻丝的应变效应, 将应变片粘贴在桥梁结构表面, 当结构受力变形, 应变片电阻值发生变化, 通过测量电阻变化反映结构局部应变。该技术能灵敏感知结构局部微小应变, 适用于桥梁关键受力部位的变形监测, 可实时获取结构局部受力状态信息。

2.3 图像监测技术

图像监测技术作为桥梁结构健康监测的重要手段, 主要包括摄影测量技术与机器视觉技术。摄影测量技术借助专业摄影设备, 从多个角度对桥梁进行拍摄, 获取丰富的影像资料。通过对影像中特征点的精准识别与高效匹配, 结合几何光学原理, 能够精确计算出特征点的三维坐标, 进而分析桥梁结构的变形情况。此技术具备非接触测量的优势, 无需在桥梁上额外安装复杂的传感器设备, 对桥梁结构无任何损伤, 尤其适用于大型桥梁以及具有特殊结构的桥梁的变形监测工作。机器视觉技术则利用摄像头实时采集桥梁图像, 运用先进的图像处理与模式识别算法, 自动识别图像中的监测目标特征, 深入分析其位置、形状等参数的变化。该技术能够实现自动化、实时监测, 通过预先设定合理的阈值, 一旦桥梁出现异常变形, 能够及时发出警报, 在桥梁日常巡检与长期健康监测中发挥着重要作用。

3 变形监测技术在桥梁监测中的应用流程

3.1 监测方案设计

监测点布置遵循关键部位优先、均匀覆盖与便于观测原则。桥梁墩台、梁体跨中、支座连接处等受力复杂区域, 以及易发生变形的部位, 需加密布置监测点; 在桥梁整体结构上, 监测点呈网格状均匀分布, 确保全面捕捉结构变形。布置时, 采用全站仪定位、卫星导航系统辅助, 精准确定监测点位置, 并做好标记与防护, 避免施工、车辆通行等外界因素干扰。监测周期依据桥梁结构类型、使用年限、荷载状况及环境因素确定。新建桥梁在施工期与运营初期, 因结构处于应力调整阶段, 监测周期较短, 一般每周或每两周进行一次; 运营多年的老旧桥梁, 考虑材料老化、疲劳损伤累积, 监测周期需适当缩短。遇强风、暴雨、地震等极端天气或特殊荷载事件后, 需立即开展专项监测, 以便及时掌握桥梁结构状态变化。

3.2 数据采集

不同监测技术对应专属数据采集方式。几何测量技术中, 水准测量使用水准仪与水准尺, 沿监测线路逐点测量高程; 全站仪在固定测站点对监测点进行角度与距离观测; 全球导航卫星系统通过接收机接收卫星信号实现定位^[3]。物理测量技术里, 光纤传感技术依靠光纤与解调设备, 实时感知结构应变; 激光扫描技术利用扫描仪围绕桥梁扫描, 获取表面三维信息; 应变片监测通过应变采集仪测量电阻变化。图像监测技术中, 摄影测量利用相机多角度拍摄桥梁影像; 机器视觉借助摄像头持续采集图像数据。数据采集设备的选择与配置需综合考虑监测需求、精度要求与现场环境。监测精度要求高的项目, 选用高精度水准仪、全站仪; 大范围、全天候监测则配置高性能全球导航卫星系统接收机。光纤传感监测需匹配合适的光纤类型与解调设备; 激光扫描根据桥梁规模选择不同扫描范围与精度的扫描仪。设备需配备稳定的供电系统与数据存储装置, 确保数据采集过程稳定可靠。

3.3 数据处理与分析

数据预处理采用多种方法提升数据质量。针对几何测量数据, 进行闭合差计算与平差处理, 消除测量误差; 剔除因设备故障、外界干扰产生的异常数据; 对缺失数据, 运用插值法、回归分析等方法进行补充。物理测量与图像监测数据, 需进行格式转换、去噪处理, 保证数据的规范性与可用性。变形趋势分析通过绘制变形曲线、对比历史数据实现。将不同监测周期的变形量按时间顺序绘制曲线, 直观展现桥梁结构变形随时间的变化趋势; 对比相同工况下不同时间段的变形数据, 分析变形发展规律。采用数学模型对变形趋势进行拟合预测, 判断桥梁结构变形是否趋于稳定, 或存在加速发展

风险。异常变形判断依据设定的阈值与变化速率准则。根据桥梁设计参数、规范要求及历史监测数据,确定位移、应变等指标的预警阈值。当监测值超过阈值,或变形速率突然增大、变化趋势出现异常转折时,判定为异常变形。结合多种监测技术结果相互印证,综合分析异常变形原因,为桥梁养护维修提供准确依据。

4 桥梁变形监测技术的挑战与发展

4.1 监测精度的现实制约

桥梁变形监测精度受自然环境与技术条件双重制约。温度波动对桥梁结构影响显著,昼夜温差致使梁体热胀冷缩,年温度循环引发材料疲劳变形,监测设备记录的微小位移变化中混杂温度形变干扰。强风作用下桥梁产生涡激振动、驰振等动态响应,测量仪器难以在结构持续晃动时获取稳定数据。降水与潮湿环境易使电子元件受潮、光学部件起雾,精密仪器的运行稳定性与测量精度均受影响。传统监测技术存在固有局限。水准测量受限于地球曲率与大气折光,长视线测量时高程误差随距离增大;全站仪需保证测站与监测点通视,复杂地形或桥梁内部结构遮挡易阻断观测路径;GNSS测量在城市峡谷、隧道等信号遮挡区域,定位精度因多路径效应与卫星信号失锁大幅下降。不同监测技术的精度评价缺乏统一标准,几何测量以毫米级点位误差衡量,物理测量侧重微应变感知灵敏度,导致监测结果难以直接对比分析。

4.2 多源数据融合的技术困境

桥梁监测常采用多种技术组合获取数据,数据融合存在多重障碍。数据特性差异导致处理难度增大,几何测量获得离散点三维坐标,光纤传感输出连续应变曲线,激光扫描生成海量点云数据,数据格式、采样频率、存储方式各不相同^[4]。监测时间不同步加剧信息匹配困难,如卫星定位系统按秒级频率采集数据,而应变片监测可实现毫秒级高频采样,异步数据难以构建完整的桥梁变形时序图谱。误差处理复杂性突出,不同技术的随机误差、系统误差量级与分布规律各异,简单叠加数据会导致误差累积,影响结构安全评估的准确性。

4.3 智能化与协同监测的发展方向

智能化监测技术正在重塑行业标准。自动化监测系统集成传感器网络、无线传输模块与边缘计算设备,实现数据实时采集、云端存储与智能分析,大幅减少人工巡检的时间成本与人为误差。深度学习算法通过分析桥梁施工记录、历史监测资料与环境数据,建立结构变形预测模型,能够提前识别异常变形趋势,为养护决策提供预警信息。多技术协同监测体系成为未来发展重点。将几何测量的高精度定位能力、物理测量的动态响应捕捉优势与图像监测的可视化特性相结合,构建覆盖桥梁全生命周期的监测网络。例如,GNSS与全站仪提供宏观位移基准,光纤传感实时监测关键部位应变,激光扫描生成三维模型进行病害分析。不同技术间数据交叉验证、优势互补,形成多层次、立体化的监测架构,有效提升桥梁安全评估的全面性与可靠性,推动监测技术向智能化、集成化方向加速发展。

结束语

变形监测技术在桥梁监测中发挥着不可替代的作用。通过对桥梁变形内容的全面监测与目标设定,采用多种监测技术获取数据,并经过科学处理与分析,能够及时发现桥梁潜在安全隐患。尽管当前面临监测精度受限、多源数据融合困难等挑战,但随着智能化与协同监测技术的发展,未来有望实现更精准、高效的桥梁监测。相信在科技不断进步的推动下,变形监测技术将为桥梁安全提供更坚实的保障,助力交通运输事业蓬勃发展。

参考文献

- [1] 栾翔.基于机器视觉的桥梁变形监测技术研究[J].中国高新科技,2024(6):40-42.
- [2] 李君.地面三维激光扫描技术在桥梁挠度变形监测中的应用[J].交通世界,2024(26):152-154.
- [3] 陈斌.桥梁钢围堰施工技术及其变形监测分析[J].设备管理与维修,2022(2):151-153.
- [4] 胡洋,韩扬,梁文鹏.三维激光扫描技术在桥梁变形监测中的应用[J].测绘通报,2024(3):179-182.